

2025 年度 名古屋大学 HPC 計算科学連携研究プロジェクト 成果報告書

「ラグランジュ的視点から探る高分子による乱流変調とその物理機構」

名古屋大学 工学研究科 小井手祐介

乱流中に微量の高分子を添加すると、劇的に乱流が抑制され、流動抵抗が大幅に減少することは古くから知られている [1]. しかし、依然として、高分子による乱流変調の素過程である、乱流中の大小様々な渦と高分子との動的な相互作用については未解明な点が多い. 代表者らは、高分子の運動は累積的な流動履歴に支配されることに着目し、高分子の視点（すなわち、ラグランジュ的視点）での乱流の理解が重要であるという作業仮説を立てた.

そこで本研究では、ラグランジュ的な視点に基づく乱流変調の理解に向けて、2 段階に分けて研究を遂行した. まず、高分子により乱流のラグランジュ的な特性がどのように変調されるかを調べた. 具体的には、希薄高分子溶液の構成則として広く用いられている FENE-P モデルを用いた直接数値計算を、レイノルズ数、高分子の緩和時間、乱流を駆動する外力を系統的に変化させて実行した (図 1). FENE-P モデルの導入に伴う計算負荷の増加のため、格子点数は最大で $N^3 = 512^3$ とし、不老 TypeI にて、MPI プロセス数 1024 で計算を行った. 本課題では、乱流のラグランジュ的な統計量として、主に、ラグランジュ速度のパワースペクトル密度 $E_L(\omega)$ に注目した. 図 2 に、レイノルズ数と外力を固定し、高分子の緩和時間 τ を変化させたときの $E_L(\omega)$ を示す. ただし、 τ はコルモゴロフ時間 τ_η で無次元化したワイゼンベルグ数 Wi_η で整理した. まず、ニュートン流体の場合 ($Wi_\eta = 0$) および $Wi_\eta = 1$ の場合には、コルモゴロフの相似仮説から予言される $E_L(\omega) \propto \omega^{-2}$ のべき乗則 [2] が高周波数領域でわずかに見られる. ところが、 $Wi_\eta > 1$ では、 Wi_η の増加に伴い、高周波数領域から順に $E_L(\omega)$ が減衰する一方で、低周波数領域では、ニュートン流体と同様のふるまいを示すことがわかった. このラグランジュ的な視点での乱流変調の物理機構を乱流中での渦の階層構造の観点から解明するため、代表者らがニュートン流体に対して開発したラグランジュ速度のスケール分解解析手法 [3] を希薄高分子溶液乱流に適用した. その結果、低周波成分の変動をもたらす大スケールの渦は、高分子添加の影響を受けずニュートン流体乱流中と同様にふるまうが、高周波成分の変動をもたらす小スケールの渦は、 Wi_η の増加に伴い、徐々に抑制される. したがって、図 2 に示したように、 Wi_η の増加に伴い、低周波領域でのふるまいは一定のまま、高周波成分から $E_L(\omega)$ が順に抑制される. 本成果は、日本流体力学会年会 2025 にて発表済みであり、現在論文投稿準備中である.

上述のように、流体運動のラグランジュ的な特性についての当初予定していた解析を完了したので、次に、高分子の運動のラグランジュ的な解析に取り組んだ. 乱流中の渦と高分子の動的な相互作用の理解に向けた問題設定として、高分子の特性は一定のまま、その濃度を変化させることを考えた. FENE-P モデルでは、高分子間の相互作用は無視しているため、流れ場が同一であれば、高分子の運動は濃度によらず同一である. ところが、乱流中では、流れの影響を受けた高分子からの反作用により流れも変調されるため、高分子の運動は濃度に依存すると考えられる. Wi_η の一定のもと、濃度を系統的に変化させたシミュレーションを行った結果、ある程度濃度が大きくなると、乱流のふるまいはほとんど同一であるにもかかわらず、高分子の伸長挙動には顕著な違いが見られた. これは乱流中での動的な相互作用が如実に反映された結果であると考えられる. 今後は、高分子と流体の両者にラグランジュ的な解析を適用し、動的な相互作用の実態を解明する.

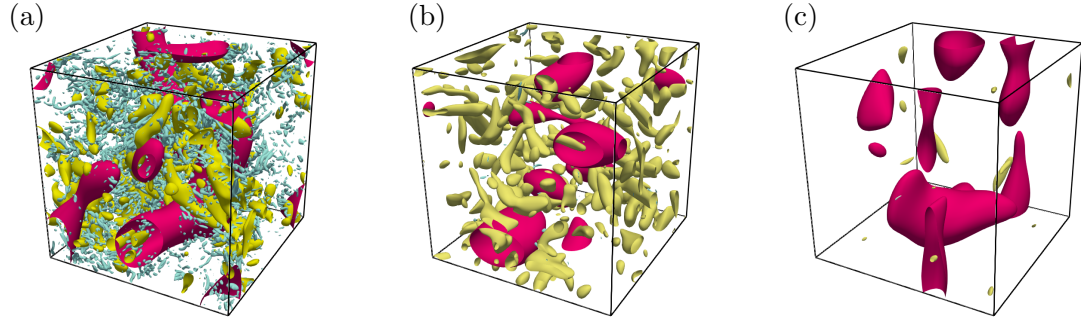


図 1: (a) ワイゼンベルグ数 $Wi_\eta = 0$, (b) 6, (c) 15 におけるスケール分解したエントロフィーの等値面. 色の違いはフィルターに用いた波数の違いを示す.

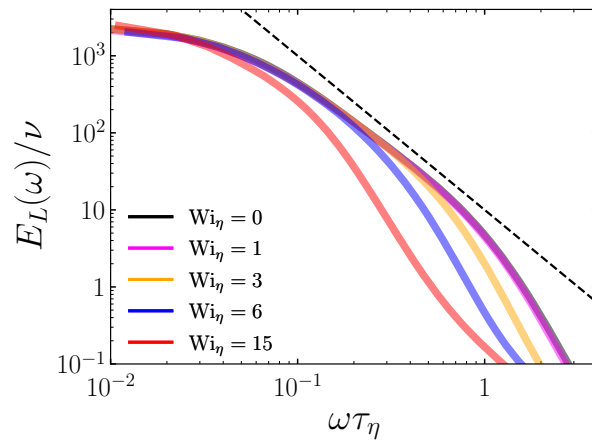


図 2: 様々なワイゼンベルグ数 Wi_η におけるラグランジュ速度のパワースペクトル密度 $E_L(\omega)$. 破線はコルモゴロフの相似仮説に基づくスケーリング則 $E_L(\omega) \propto \omega^{-2}$ を示す.

参考文献

- [1] C. M. White and M. G. Mungal, Annu. Rev. Fluid Mech. **40**, 235 (2008).
- [2] N. Mordant, P. Metz, O. Michel, and J. F. Pinton, Phys. Rev. Lett. **87**, 214501 (2001).
- [3] Y. Koide and S. Goto, Phys. Rev. Fluids **10**, 054609 (2025).